ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 519.711 DOI 10.12737/22157

Применение раскрашенных временных сетей Петри для моделирования цементного производства[*]

И. А. Седых[1], Е. С. Аникеев[2]**
[1,2] Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Российская Федерация

Application of colored timed Petri nets for cement production simulation [***]

I. A. Sedykh[1], E. S. Anikeev[2]**
[1,2] Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

Целью работы является создание модели сложного распределенного объекта — цементного производства на основе раскрашенных временных сетей Петри, ее анализ и оценка с точки зрения эффективности и достоверности. В работе рассмотрены различные виды сетей Петри, способы их задания и динамика работы. Для раскрашенных временных сетей Петри сформулирован алгоритм функционирования в матричной форме. На основе раскрашенных временных сетей построена математическая модель, позволяющая спрогнозировать объем цементного производства за определенный период. Модель реализована на языке программирования C++. Проведено сравнение результатов моделирования с фактическими данными. Установлено, что реализованная модель с достаточной точностью предсказывает объем выпуска продукции цементного производства. Разработанные методы работоспособны и применимы в моделировании производственных процессов в составе автоматизированной системы управления технологическими показателями.

Ключевые слова: модель, моделирование, раскрашенная временная сеть Петри, цементное производство, алгоритм, производственные процессы.

The work objective is to develop a special model of the complex distributed object – the cement production – on the basis of the colored timed Petri nets including its analysis and estimation of effectiveness and correctness. Various kinds of the Petri nets together with the methods of their determination and performance dynamics are considered. An operation algorithm is formulated in the matrix form for the colored timed Petri nets. On the basis of the colored timed nets, a mathematical model that allows predicting the cement production volume for a defined period is built. The discussed model is realized in the C++ language. The simulation results are compared to the factual data. It is found that the implemented model with a reasonable degree of accuracy predicts the output volume of the cement production. The developed methods are operable and applicable in the manufacturing process simulation as part of an automated control system of the technology parameters.

Keywords: model, simulation, colored timed Petri net, cement production, algorithm, production processes.

Введение. В работе рассмотрена методика создания модели на примере сложной распределенной системы — технологического процесса функционирования цементного производства. Процесс выпуска цемента является одним из примеров недетерминированных динамических параллельных производственных систем, проблема моделирования которых связана как с возможной хаотичностью системы, так и с необходимостью учитывать динамику подсистем.

Для описания и анализа таких систем могут применяться сети Петри [1–3] и их разновидности, например, нечеткие [4], временные [5–6], раскрашенные [7].

В [8–10] рассмотрены окрестностные модели обжига клинкера цементного производства. В [11] при моделировании процесса функционирования цементного производства использованы временные сети Петри, достоинствами которых являются динамическое отражение состояний моделируемой системы и возможность анализа свойств полученной модели.

---

[*] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-07-00-854).
[**] E-mail: sedykh-irina@yandex.ru, evgenij-anikeev@yandex.ru
[***] The research is done with the financial support from RFFI (project no. 16-07-00-854).

В работе рассмотрены раскрашенные временные сети Петри, являющиеся сетями более высокого уровня и позволяющие, по сравнению с обычными сетями Петри, анализировать дополнительные свойства моделируемых процессов без усложнения структуры сети.

Так, во временных сетях, в отличие от обычных сетей Петри, переходы срабатывают с некоторой задержкой, а маркеры находятся в позициях определенное время, что дает возможность моделирования не только последовательности событий, но и их привязку ко времени.

Раскрашенные сети Петри позволяют одновременно моделировать несколько параллельных потоков различных материалов или событий в процессе функционирования сложных систем. В аналогичных моделях на основе обычных сетей Петри приходится искусственно вводить дополнительные позиции, не являющиеся отображениями элементов процесса, служащие для упорядочения запусков переходов сети и разделения материалов или событий, что усложняет пространственную структуру модели и затрудняет ее интерпретацию.

Раскрашенные временные сети Петри, используемые в работе, объединяют в себе приведенные достоинства как раскрашенных, так и временных сетей.

В работе построен опытный образец модели расчёта объема выпуска продукции цементного производства по месяцам в течение одного года на основе раскрашенных временных сетей Петри.

Разработана программа на языке С++, позволяющая рассчитать производительность цементного производства за заданный период. Реализованная модель с достаточной точностью предсказывает объем выпуска продукции.

Способы задания и правила функционирования сетей Петри. Существует три эквивалентных способа задания сети Петри: графический, аналитический и матричный [3, 11].

Графически сети Петри представляются в виде двудольных графов. Множество вершин состоит из непересекающихся подмножеств позиций $P=\{p_i\},\ i=1,\ldots,n$ и переходов $T=\{t_j\},\ j=1,\ldots,m$, а множество дуг разделяется на два подмножества $\{(p_i,t_j)\}\subseteq P\times T$ и $\{(t_j,p_i)\}\subseteq T\times P$. В изображении графов, представляющих сети Петри, позиции обозначаются кружками, а переходы — планками.

Далее рассмотрим аналитическо-матричный способ задания сетей Петри [11]. Сеть Петри задается следующим набором $PN=(P,T,R^-,R^+,\mu_0)$, где:

– $P=\{p_1,p_2,\ldots,p_n\}$ — конечное непустое множество позиций;

– $T=\{t_1,t_2,\ldots,t_m\}$ — конечное непустое множество переходов (множества P и T не пересекаются: $P\bigcap T=\varnothing$);

– $R^-\in \mathrm{R}^{m\times n}$ — матрица инцидентности дуг, входящих в переходы;

– $R^+\in \mathrm{R}^{m\times n}$ — матрица инцидентности дуг, выходящих из переходов;

– $\mu_0=\{\mu_1,\mu_2,\ldots,\mu_n\}$ — вектор начальной маркировки сети Петри.

Приведем алгоритм функционирования сети Петри:

1. Текущая маркировка сети равна начальной $\mu=\mu_0$.

2. Переход t_j $(j=1,...,m)$ при текущей маркировке μ разрешен, если $\mu\geq e_j\cdot R^-$, где $e_j=[0,0,\ldots,1_j,\ldots,0]\in \mathrm{R}^m$ — строка, содержащая нули везде, за исключением *j*-го элемента. Заметим, что разрешенных переходов при текущей маркировке может быть несколько. Если нет разрешенных переходов, сеть достигла тупиковой маркировки, дальнейшее функционирование невозможно, конец алгоритма. Иначе переходим к пункту 3.

3. Случайным образом выбирается один из разрешенных переходов t_j $(j=1,...,m)$.

4. Маркеры перемещаются из входных позиций выбранного перехода t_j во все его выходные позиции по формуле $\mu=\mu+e_j\cdot R$, где $R=R^+-R^-$ — матрица инцидентности сети Петри.

Виды сетей Петри. Раскрашенная временная сеть Петри. Во временных сетях Петри [5] $PN_{pt}=(P,T,R^-,R^+,\mu_0,Z,S)$ вводятся в рассмотрение временные задержки маркеров в позициях и время срабатывания разрешенных переходов, где:

– $S=\{S_1,S_2,\ldots,S_n\}$ — вектор задержек маркеров в позициях;

– $Z=\{Z_1,Z_2,\ldots,Z_m\}$ — вектор времени срабатывания разрешенных переходов.

Раскрашенная сеть Петри [7] $PN_c = (P, T, C, \hat{R}^-, \hat{R}^+, \hat{\mu}_0)$ отличается от PN наличием цветов, матрицей, а не вектором, начальной маркировки и блочной структурой матриц инцидентности, где:

– $C = \{c_1, c_2, \dots, c_d\}$ — цвета сети;

– $R^- \in \mathrm{R}^{(d \cdot m) \times n}$ — блочная матрица инцидентности дуг, входящих в переходы;

$R^- = \begin{bmatrix} R_1^- \\ R_2^- \\ \vdots \\ R_d^- \end{bmatrix}$, где R_k^- — матрица инцидентности входящих дуг цвета C_k, $k = 1, \dots, d$;

– $R^+ \in \mathrm{R}^{(d \cdot m) \times n}$ — блочная матрица инцидентности дуг, выходящих из переходов;

$R^+ = \begin{bmatrix} R_1^+ \\ R_2^+ \\ \vdots \\ R_d^+ \end{bmatrix}$, где R_k^+ — матрица инцидентности выходящих дуг цвета C_k;

– $\hat{\mu}_0 \in \mathrm{R}^{d \times n}$ — матрица начальной маркировки.

Обобщением временной и раскрашенной сети является раскрашенная временная сеть Петри $PN_{cpt} = (P, T, C, \hat{R}^-, \hat{R}^+, \hat{\mu}_0, Z, S)$.

Представление цементного производства посредством раскрашенных временных сетей Петри. Рассмотрим в данном пункте реализацию модели на примере сложного распределенного объекта — технологического процесса функционирования цементного производства ЗАО «Липецкцемент».

На рис. 1 изображен граф раскрашенной временной сети Петри, иллюстрирующий производственный цикл цементного производства.

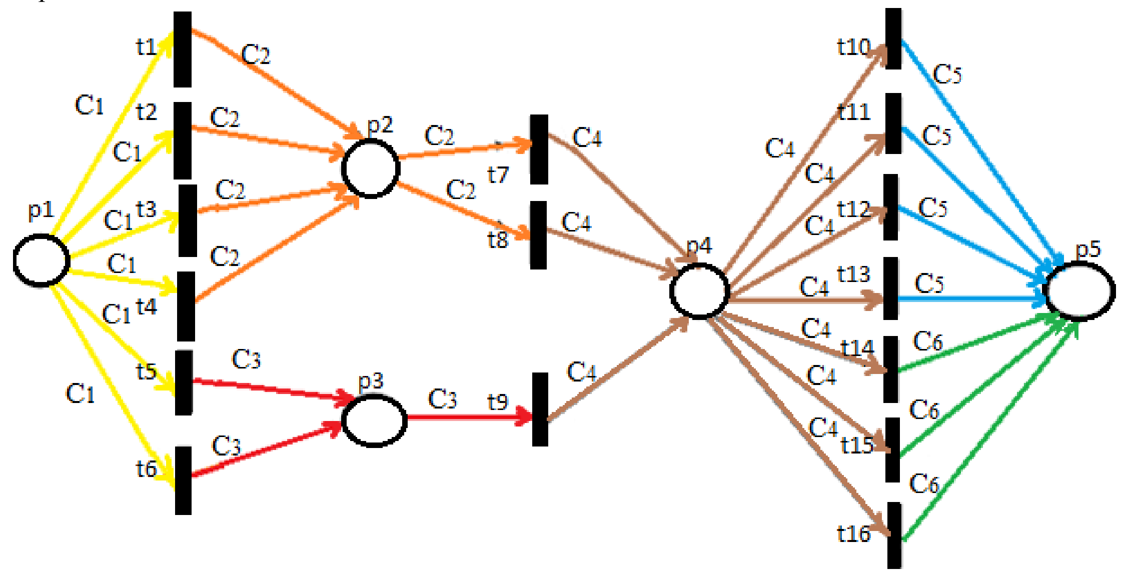


Рис. 1. Граф раскрашенной временной сети Петри цементного производства

Позиции $p_1 - p_5$ на рис. 1 соответствуют следующим складам:

– p_1 — склад сырья;

– p_2 — силос сырьевой муки;

– p_3 — силос сырьевой муки;

– p_4 — склад клинкера;

– p_5 — силос цемента.

Переходы $t_1 - t_{16}$ соответствуют агрегатам:

– $t_1 - t_4$ — сепараторные мельницы 3,2×8,5 м;

– $t_5 - t_6$ — трубные мельницы 4,2×10 м;

– $t_7 - t_8$ — вращающиеся печи 4×60 м;

– t_9 — вращающаяся печь 5×75 м;

– $t_{10} - t_{13}$ — цементные мельницы 3×14 м;

– $t_{14} - t_{16}$ — цементные мельницы 3,2×15 м.

Граф сети Петри имеет цвета $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6\}$ (рис. 1).

Блочные матрицы инцидентности входов и выходов переходов R^- и R^+ соответственно равны:

$$R^- = \begin{bmatrix} R_1^- \\ R_2^- \\ \vdots \\ R_6^- \end{bmatrix}, \; R^+ = \begin{bmatrix} R_1^+ \\ R_2^+ \\ \vdots \\ R_6^+ \end{bmatrix}.$$

В частности, для цвета C_2 матрица R_2^- равна:

$$R_2^- = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{27}^{2-} & r_{28}^{2-} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

где r_{2j}^{2-} — количество сырья, поступающего со склада p_2 во вращающуюся печь t_j $(j = 7,\ 8)$. Остальные элементы матрицы R_2^- равны нулю, так как в графе сети Петри имеется только две входящие оранжевые дуги C_2, соответствующие переходам $t_7 - t_8$ и позиции p_2 (рис. 1).

Матрица R_2^+ равна:

$$R_2^+ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r_{21}^{2+} & r_{22}^{2+} & r_{23}^{2+} & r_{24}^{2+} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

где r_{2j}^{2+} — производительность сепараторной мельницы t_j $(j = 1,...,4)$. Другие элементы матрицы R_2^+ являются нулевыми, так как в графе имеется только четыре выходящие оранжевые дуги C_2, соответствующие переходам $t_1 - t_4$ и позиции p_2 (рис. 1).

Остальные матрицы R_k^-, R_k^+ $(k = 1,...,6)$ формируются аналогично.

Раскрашенная временная сеть Петри цементного производства функционирует по следующему алгоритму:

1. Начальное время функционирования сети $\tau = 0$; начальная маркировка μ_0 описывает количество материала на складах в начальный момент времени; время функционирования производства равно T часов. Все переходы сети Петри являются незаблокированными.

2. Незаблокированные переходы сети t_j, $j = 1,...,m'$ последовательно проверяются на разрешенность. Переход t_j при текущей маркировке μ_τ разрешен, если $\mu_\tau \geq e_j \otimes R^-$, где $e_j = [0, 0, \ldots, 1_j, \ldots, 0]$ — строка, содержащая нули везде, за исключением *j*-го элемента; операция $\otimes$ означает произведение строки e_j на каждую из матриц R_k^-, образующих блочную матрицу $R^- = \left[R_1^-, R_2^-, ..., R_d^- \right]^T$. Если нет разрешенных переходов, переход к п.4.

3. Маркеры перемещаются в разрешенный переход t_j. Результат начала запуска перехода t_j при текущей маркировке μ_τ записывается как $\mu_\tau' = \mu_\tau - e_j \otimes R^-$. Далее переход блокируется на время S_j выполнения операции.

Переход к п.2.

4. Сдвиг времени на $\tau = \tau + 1$ час. Если $\tau \geq T$, то алгоритм завершен. Маркеры переходят в выходные позиции разрешенных в п.3 незаблокированных в данный момент времени переходов t_j по следующей формуле $\mu_\tau = \mu'_\tau + e_j \otimes R^+$. Переход к п.2.

По данному алгоритму была разработана программа на языке С++, целью которой является моделирование динамики состояний системы и вычисление объема выпуска продукции цементного производства за определенный период.

Рассмотрено функционирование модели на основе реальных данных за 2012 год. Результаты, полученные в процессе моделирования, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Относительная ошибка выпуска продукции

Месяц	Относительная ошибка моделирования, %
январь	0,134940
февраль	0,480579
март	0,691856
апрель	0,080636
май	0,257613
июнь	0,099582
июль	0,235929
август	0,036875
сентябрь	0,076327
октябрь	0,407839
ноябрь	0,452516
декабрь	0,071766

Относительная ошибка найденного объема выпуска продукции вычисляется по формуле:

$$\delta P_i = \left| \frac{y_i - \tilde{y}_i}{y_i} \right| * 100\%,$$

где y_i — реальные данные выпуска продукции за i-ый месяц $(i = 1,...,12)$;

$\tilde{y}_i$ — модельные данные выпуска продукции за i-ый месяц.

Средняя относительная ошибка моделирования составляет 0,25% и является допустимой для применения предложенной модели при прогнозировании объема выпуска продукции цементного производства. Таким образом, проведенные расчеты свидетельствуют об адекватности разработанной модели.

Заключение. В работе реализовано представление раскрашенных временных сетей Петри в матричной форме, сформулирован алгоритм их функционирования.

Раскрашенные временные сети Петри применены в моделировании сложного распределенного объекта — цементного производства. В качестве приложения рассматривается ЗАО «Липецкцемент».

Разработано программное обеспечение на языке С++ для реализации модели функционирования цементного производства. Проведено сравнение результатов моделирования с фактическими данными. Оценена пригодность разработанной модели для прогнозирования производственных процессов на основе данных 2012 года.

Реализованная модель с достаточной точностью предсказывает объем выпуска продукции и может быть эффективно использована для прогноза и анализа динамики производственных процессов.

Библиографический список

1. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж Питерсон. — Москва : Мир, 1984. — 264 с.
2. Котов, В. Е. Сети Петри / В. Е. Котов. — Москва : Наука, 1984. — 160 с.
3. Васильев, В. В. Сети Петри: параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем / В.В. Васильев, В. В. Кузьмук. — Киев : Наукова думка, 1990. — 213 с.

4. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. — Санкт Петербург : БХВ-Петербург, 2005. — 736 с.

5. Воевода, А. А. Временные сети Петри и диаграммы UML / А. А. Воевода // Науч. вестн. НГТУ. — 2009. — № 4(37). — С. 169–174.

6. Wang, J. Timed Petri Nets: Theory and Application / J. Wang. — Norwell : Kluwer Academic Publishers, 1998. — 296 p.

7. Ехлаков, Ю. П. Цветные сети Петри в моделировании социально-экономических систем / Ю. П. Ехлаков, В. Ф. Тарасенко, О. И. Жуковский // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. — 2013. — №3 (29). — С. 83–92.

8. Шмырин, А. М. Наличие экстремумов параметрического уравнения печи обжига клинкера / А. М. Шмырин, И. А. Седых, А. П. Щербаков, А. Г. Ярцев // Вести высших учебных заведений Черноземья. — 2015. — №1(39). — С. 62–67.

9. Шмырин, А. М. Исследование окрестностной модели печи обжига клинкера с учетом допустимых значений параметров / А. М. Шмырин, И. А. Седых, А. П Щербаков, А. Г. Ярцев // Вестник Липецкого Государственного Технического университета. — 2015. — №2(24). — С. 11–14.

10. Шмырин, А. М. Алгоритмы идентификации и управления функционированием окрестностных систем, полученных на основе сетей Петри / А. М. Шмырин, И. А. Седых // Управление большими системами. — 2009. — Вып. 24. — С. 18–33.

11. Блюмин, С. Л. Окрестностное моделирование сетей Петри / С. Л. Блюмин, А. М. Шмырин, И. А. Седых, В. Ю. Филоненко. — Липецк : ЛЭГИ, 2010. — 124 с.

References

1. Peterson, J. Teoriya setey Petri i modelirovanie system. [Petri Net Theory and the Modeling of Systems.] Moscow: Mir, 1984, 264 p. (in Russian).

2. Kotov, V. E. Seti Petri. [Petri nets.] Moscow: Nauka, 1984, 160 p. (in Russian).

3. Vasiliev, V. V., Kuzmuk V. V. Seti Petri: parallel'nye algoritmy i modeli mul'tiprotsessornykh system. [Petri nets: parallel algorithms and models of multiprocessor systems.] Kiev: Naukova dumka, 1990, 213 p. (in Russian).

4. Leonenkov, A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH. [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH software environment.] St.Petersburg: BKhV-Peterburg, 2005, 736 p. (in Russian).

5. Voyevoda, A. A. Vremennye seti Petri i diagrammy UML. [Timed Petri nets and UML activity diagrams.] Scientific Bulletin of NSTU, 2009, no. 4(37), pp. 169–174 (in Russian).

6. Wang, J. Timed Petri Nets: Theory and Application. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1998, 296 p.

7. Ekhlakov, Y. P., Tarasenko, V. F., Zhukovsky, O. I. Tsvetnye seti Petri v modelirovanii sotsial'no-ekonomicheskikh sistem. [Color Petri nets in modeling of socio-economic systems.] Proceedings of TUSUR University, 2013, no. 3 (29), pp. 83–92 (in Russian).

8. Shmyrin, A. M., Sedykh, I. A., Scherbakov, A. P., Yartsev, A. G. Nalichie ekstremumov parametricheskogo uravneniya pechi obzhiga klinkera. [The presence of clinker furnace parametric equation extrema.] News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region, 2015, no. 1(39), pp. 62–67 (in Russian).

9. Shmyrin, A. M., Sedykh, I. A., Scherbakov, A. P., Yartsev, A. G. Issledovanie okrestnostnoy modeli pechi obzhiga klinkera s uchetom dopustimykh znacheniy parametrov. [Research of a neighborhood model of a clinker kiln taking into account admissible parameter values.] Vestnik LSTU, 2015, no. 2(24), pp. 11–14 (in Russian).

10. Shmyrin, A. M., Sedykh I. A. Algoritmy identifikatsii i upravleniya funktsionirovaniem okrestnostnykh sistem, poluchennykh na osnove setey Petri. [Algorithms of identification and operational control of neighborhood systems built on the basis of Petri nets.] Large-scale Systems Control, 2009, iss. 24, pp. 18 – 33 (in Russian).

11. Blyumin, S.L., Shmyrin, A.M., Sedykh, I.A., Filonenko, V.Y. Okrestnostnoe modelirovanie setey Petri. [Neighborhood modeling of Petri nets.] Lipetsk: LEGI, 2010, 124 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 14.07.2016
Сдана в редакцию 14.07.2016
Запланирована в номер 30.09.2016

Received 14.07.2016
Submitted 14.07.2016
Scheduled in the issue 30.09.2016